

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2014**

**Lukáš Zbránek**

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Způsoby fixace optického vlákna pro použití v  
interferometrických měření**

**Fixation methods of Optical Fibers for Use in Interferometric  
Measurements**

**2014**

**Lukáš Zbránek**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Zbránek**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: Způsoby fixace optického vlákna pro použití v interferometrických měření  
Fixation Methods of Optical Fibers for Use in Interferometric Measurements

Zásady pro vypracování:

1. Popište problematiku optických vláknových senzorických měření.
2. Podrobně popište problematiku interferometrických měření.
3. Experimentálně analyzujte různé typy fixací optického vlákna v interferometrických měřeních.
4. Porovnejte a vyhodnoťte jednotlivé výsledky a vhodnost fixací vzhledem ke konstrukčním nárokům a citlivosti měřicí sestavy.

Seznam doporučené odborné literatury:

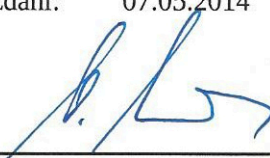
- [1] LOPEZ-HIGUERA, Jose Miguel. *Handbook of optical fibre sensing technology*. New York: Wiley, 2002, 795 p. ISBN 04-718-2053-9.
- [2] DERIKSON, Dennis. *Fiber Optic Test and Measurement*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998, 795 p. ISBN 01-353-4330-5.
- [3] BOTTACCHI, Stefano. *Noise and signal interference in optical fiber transmission systems: an optimum design approach*. Chichester, UK: John Wiley, 2008, 831 p. ISBN 04-700-6061-1.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jakub Čubík**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 7. května 2014

D. Zbránek  
podpis studenta



## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mě při zpracování této bakalářské práce jakkoliv podporovali. Hlavně bych chtěl poděkovat svému vedoucímu, panu Ing. Jakubu Čubíkovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Zbránek, L. Způsoby fixace optického vlákna pro použití v interferometrických měření. Ostrava: Vysoká škola báňská, obor Telekomunikační technika, 2014, počet str. 46, vedoucí práce: Ing., Čubík, Jakub.

Hlavním cílem bakalářské práce je pomocí Mach-Zehnderova interferometru změřit frekvenční odezvu různých způsobů fixací optických vláken pro pět rozdílných frekvencí a zjistit, která fixace optického vlákna je pro danou frekvenci nejvhodnější.

Teoretická část práce obsahuje uvedení do problematiky senzorických měření a bližší seznámení s pojmem interference a Mach-Zehnderovým interferometrem. Praktická část práce je zaměřená na sestavení měřicího přístroje, přesněji dvousvazkového Mach-Zehnderova interferometru a zpracování výsledků.

V závěru bakalářské práce jsou uvedeny výsledky naměřených hodnot a doporučení autora, který způsob fixace je pro danou frekvenci nejvhodnější.

## **Klíčová slova**

Optické vláknové senzory; Optické vlákno; Interference; Interferometr; Mach-Zehnderův interferometr; Frekvenční odezva

## **Abstract**

Zbránek, L. Fixation methods of optical fibers for use in interferometric measurements. Ostrava: Technical University of Ostrava, Telecommunications technology, 2014, 46 pages, thesis supervisor: Ing., Čubík, Jakub.

The main goal of the thesis is to measure frequency response of various optical fibre fixations for five different frequencies, using the Mach-Zehnder interferometer, and determine which fixation of the optical fibre is most suitable for a given frequency.

Theoretical part consists of introduction into the topic of sensorial measurements and familiarization with the term “interference” and “Mach-Zehnder interferometer.”

The practical part is aimed at assembling a measuring instrument – a two beam Mach-Zehnder interferometer – and processing the results. Results and assessment of the measured values are presented at the end of the thesis, along with the author’s recommendation, as to which of the fixations is the most appropriate for the given frequency.

## **Key words**

Fiber optic sensors; Optical fiber; Interference, Interferometer; Mach-Zehnder interferometer; Frequency response

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
<b>2D</b>	Two-dimensional – dvourozměrný
<b>3D</b>	Three-dimensional - trojrozměrný
<b>dBV</b>	Hodnota vztažená k 1 Voltu
<b>FC</b>	Flat-contact – typ broušení ferule, plochý kontakt
<b>FD</b>	Fotodetektor
<b>GI</b>	Gradientní index
<b>MM</b>	Multi mode – vicemódové
<b>MMF</b>	Multi mode optical fiber – vicemódové optické vlákno
<b>M-Z</b>	Mach-Zehnderův
<b>NI-USB</b>	Měřicí karta NI USB-6210
<b>OLS</b>	Optical light source – optický zdroj světla
<b>RMS</b>	Efektivní hodnota časově proměnného signálu
<b>SI</b>	Step index – krokový index
<b>SM</b>	Single mode – jednomódové
<b>SMF</b>	Single mode optical fiber – jednomódové optické vlákno
<b>V</b>	Volt – jednotka napětí

# Obsah

Úvod.....	- 11 -
1 Optické vláknové senzory .....	- 12 -
1.1 Rozdělení optovláknových senzorů.....	- 12 -
2 Optická vlákna.....	- 13 -
2.1 Princip funkce .....	- 13 -
2.1.1 Totální odraz.....	- 13 -
2.1.2 Index lomu.....	- 14 -
2.2 Módy ve vláknech.....	- 14 -
2.2.1 Rozdělení módů.....	- 14 -
2.3 Typy vláken.....	- 15 -
2.3.1 Jednomódová vlákna .....	- 15 -
2.3.2 Vícemódová vlákna .....	- 15 -
2.4 Vlastnosti optického vlákna .....	- 17 -
2.4.1 Útlum.....	- 17 -
2.4.2 Disperze.....	- 17 -
3 Interference .....	- 18 -
3.1 Interference světla .....	- 18 -
3.2 Podmínky pro vznik interference .....	- 19 -
3.3 Koherence světla .....	- 19 -
3.3.1 Časová koherence.....	- 19 -
3.3.2 Prostorová koherence .....	- 20 -
4 Interferometr .....	- 22 -
4.1 Typy interferometrů .....	- 22 -
4.1.1 Michelsonův interferometr .....	- 22 -
4.1.2 Fabryův-Perotův interferometr.....	- 23 -
5 Mach-Zehnderův interferometr .....	- 24 -
5.1 Princip funkce .....	- 24 -
6 Měření pomocí Mach-Zehnderova interferometru.....	- 25 -
6.1 Zapojení měřicí soustavy .....	- 25 -

6.1.1	Jednotlivé části zapojení.....	- 25 -
6.2	Měření dat .....	- 28 -
6.3	Znázornění naměřeného signálu M-Z interferometru .....	- 29 -
7	Způsoby fixací optického vlákna .....	- 31 -
7.1	Husí krk .....	- 32 -
7.2	Hliníková trubka.....	- 33 -
7.3	Ocelové skoby .....	- 34 -
7.4	Sekundové lepidlo .....	- 35 -
7.5	Oboustranná lepicí páska .....	- 36 -
7.6	Plastová lišta.....	- 37 -
7.7	Plastová lišta vyplněná sanitárním silikonem .....	- 38 -
8	Zpracování výsledků .....	- 39 -
8.1	Medián.....	- 39 -
8.2	Výsledná tabulka .....	- 39 -
8.3	Vyhodnocení výsledků .....	- 40 -
9	Závěr .....	- 42 -
	Použitá literatura .....	- 43 -
	Seznam příloh.....	- 45 -

# Úvod

Úkolem mé bakalářské práce je zjistit, který způsob uchycení optického vlákna pro použití v interferometrických měření je nejvhodnější. Pro tato měření jsem využil vlastností dvousvazkového Mach-Zehnderova interferometru.

Teoretická část bakalářské práce popisuje problematiku optických vláknových senzorů a interferometrických měření. Jelikož v mé práci využívám Mach-Zehnderův interferometr, pokusil jsem se přiblížit, jak takové interferometry fungují a jaké druhy interferometrů máme.

V praktické části bylo mým úkolem experimentálně analyzovat různé typy fixací optického vlákna. Pomocí přímé metody jsem změřil útlum optických vláken, které jsem následně upevnil na dřevěnou desku pomoci sedmi způsobů uchycení. Pro fixaci jsem použil husí krk, hliníkovou trubku, plastovou lištu, plastovou lištu vyplněnou sanitárním silikonem, ocelové skoby, oboustrannou lepící pásku a sekundové lepidlo. Na tuto desku jsem během měření reproduktorem vysílal frekvenci o velikosti 200, 500, 1000, 2000 a 4000Hz, které jsem pomocí Mach-Zehnderova interferometru zaznamenával v počítači pomocí měřicí karty a data ukládal do souboru v programu jménem LabVIEW. V poslední řadě bylo mým úkolem zachycená data vyhodnotit a zpracovat v programu jménem MatLAB a zjistit, který způsob uchycení pro danou frekvenci je nejvíce vyhovující.



# 1 Optické vláknové senzory

Optická vlákna způsobila svým nástupem do světa komunikačních technologií opravdový průlom. Podílely se na tom především velké společnosti, zabývající se telekomunikacemi. Největšího rozmachu se dočkaly pro využití přenosu internetové sítě po celém světě. Tato optická vlákna díky svým výborným přenosovým vlastnostem jako jsou nízký útlum, velká šířka přenosového pásma, odolnost vůči elektromagnetickému rušení a v neposlední řadě finančně přijatelné dostupnosti, jsou v této oblasti jen těžce nahraditelná a málo které přenosové médium se jim dokáže vyrovnat.

Ze začátku se optická vlákna používaly jen jako přenosové médium velkého objemu dat na velké vzdálenosti. Ovšem později se pro tyto vlákna našlo uplatnění i v jiných oblastech a to například jako snímače fyzikálních veličin. Je možné tato vlákna využít pro celou řadu snímání fyzikálních veličin, jako jsou např. snímače tlaku, teploty nebo vibrací. Musíme ale znát, jak tato vlákna správně uspořádat a jaké jsou jejich vlastnosti přenosu světla daným vláknem.

## 1.1 Rozdělení optovláknových senzorů

Na úvod něco málo k základnímu rozdělení optovláknových senzorů a to na dvě skupiny. První skupina zastává senzory, kde vlákno slouží jen pro přenos informace a druhá skupina zastává senzory, kde vlákno slouží pouze jako detektor. Dalším důležitým rozdělením je podle prostorového uspořádání a to na bodové senzory, rozprostřené - distribuované senzory a semi - distribuované senzory. Tyto metody používáme na základě toho, co potřebujeme měřit.[1]

Optovláknové senzory lze rozdělit i podle použité technologie, oblasti aplikace nebo zkrátka podle toho, co zrovna potřebujeme měřit. V současnosti s těmito senzory umíme měřit např. veličiny fyzikální a chemické. Mezi senzory fyzikálních veličin patří senzory pro měření teploty, mechanického napětí, deformace, tlaku, posuvu, vibrace, atd. Mezi senzory chemické a biochemické patří např. pro měření parciálního tlaku kyslíku.[1]

## 2 Optická vlákna

Světlo se jako komunikační prostředek začalo využívat již v dávných dobách za pomoci ohně nebo kouřových signálů. Tento komunikační prostředek lidé používali snad tisíce let. Optické vlákno jako takové, se začalo využívat až ve dvacátém století našeho letopočtu a to díky technologické vyspělosti. Díky vynálezu laseru jako zdroje záření a možnosti použití optického vlákna na bázi křemenného skla taženého do dlouhých kabelů. Tyto kabely díky svým vlastnostem jsou schopna přenášet informace na velké vzdálenosti a velkou rychlostí.

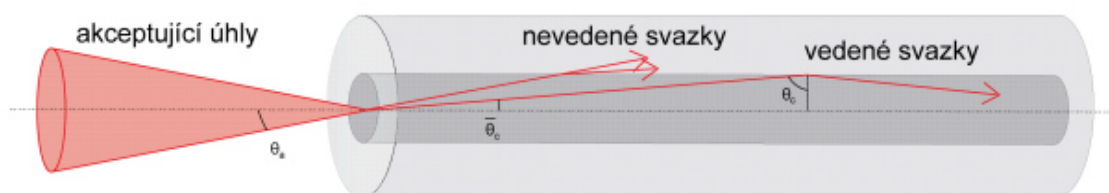
V dnešní době jsou optická vlákna vyráběna především z materiálů na bázi skla a z polymerů, kde světlo je vedeno ve směru podélné osy. Optické vlákno je složeno ze dvou základních částí, kterou tvoří jádro a plášť. Jádro a plášť bývá obaleno primární a sekundární ochranou, která nám optické vlákno chrání proti poškození. Jsou používána místo kovových vodičů, protože mají daleko lepší přenosové vlastnosti a jsou odolné vůči elektromagnetickému rušení.[2],[3]

### 2.1 Princip funkce

Optické vlákno je vlastně válečkový dielektrický vlnovod. Tímto vláknem se šíří elektromagnetické vlny, které můžou představovat např. světlo nebo infračervené záření. Tyto elektromagnetické vlny se šíří ve směru osy vlákna, kde využívají principu totálního odrazu na rozhraní dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. Ve vlákně představuje vnitřní část jádro a okolo tohoto jádra je plášť a primární ochrana. Aby mohlo k tomuto jevu docházet, musí být splněna podmínka, že jádro má vyšší index lomu, než jeho plášť. V datových sítích se používají především mnohavidová vlákna neboli multi mode (MM) a v telekomunikacích se v dnešní době využívají výhradně vlákna jednovidová neboli single mode (SM).[2]

#### 2.1.1 Totální odraz

Světlo pohybující se v hustém prostředí a dopadající na rozhraní pod šikmým úhlem, větším než je úhel mezní, bude kompletně odraženo. Tohoto efektu se využívá v optických vláknech. Totální odraz slouží k tomu, abychom dokázali udržet světelný paprsek v jádře vlákna. Světelný paprsek musí dopadnout na odrazovou plochu s úhlem větším, než je úhel kritický. Pouze světelný paprsek, který vstoupí do vlákna v určitém rozsahu úhlu se může šířit bez propuštění. Rozsah úhlů, které do vlákna mohou vstoupit se nazývá „vstupní kužel“. Velikost vstupního kužele je funkcí indexu lomu a rozdílu mezi jádrem vlákna a obložením.[2],[3]



Obrázek 2.1: Přípustné úhly dopadajícího svazku  $\theta_a$  do vlákna. Paprsky z kužele jsou vedeny ve vlákně pomocí totálního odrazu.

### 2.1.2 Index lomu

Je to bezrozměrná fyzikální veličina, která nám popisuje šíření světla v daném prostředí a je větší než 1. Vyjadřuje nám tedy poměr rychlosti světla ve vakuu s rychlostí světla šířící se v daném materiálu. Rychlost světla ve vakuu je asi 300 milionů metrů za sekundu. Hodnota indexu lomu pláště se udává okolo 1,46 a typická hodnota pro index lomu jádra je 1,48.

Obecně tedy pro index lomu platí vztah:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

Kde:  $n$  ... udává index lomu

$c$  ... je rychlost světla [m/s]

$v$  ... je rychlost světla v daném prostředí [m/s]

## 2.2 Módy ve vlákně

Díky omezenému prostoru vlnovodu a interferenci světla, se ve vlákně vytvoří jednotlivé paprsky, které jsou vlastně stojatým vlněním. Z pohledu elektromagnetické optiky se jedná o ustálenou elektromagnetickou konfiguraci ve vlákně. Energie, která se do vlákna naváže se přerozdělí tak, aby se mohla vlákem šířit a aby jednotlivé módy splňovaly podmínkou stojatých vln. Mezi módem a paprskem je rozdíl ten, že paprsek je jistou aproximací módu. Paprsek si totiž většina lidí představuje jako přímku. Kdežto mód určuje jakýsi stupeň rozdělení energie v konečném prostoru.[4]

### 2.2.1 Rozdělení módů

Módy se v optickém vlákně dají rozdělit do třech druhů:

- Vedené módy – Jsou to módy, které splňují podmínku totálního odrazu na rozhraní jádra a pláště. Tyto módy jsou vedeny jádrem a k jejich vyvážení je zapotřebí velmi velký ohyb vlákna, ale i při velmi velkém ohybu se vyváží jen nejvyšší módy.
- Vyzařující módy – Jsou to módy, které jdou do vlákna navázány pod úhlem větším než je numerická apertura. Tyto módy netvoří stojaté vlny v jádře a tím nesplňují podmínku totálního odrazu na rozhraní jádra a pláště. Nejsou vedeny jádrem vlákna a z toho vyplývá, že ztrácí energii.

- Tunelující módy – Tyto módy sice tvoří stojaté vlnění, ale nesplňují podmínku totálního odrazu na rozhraní jádra a pláště. Tyto nestabilní módy se „přelévají“ mezi módy vedenými a módy vyzařovanými. U těchto módů dochází velmi snadno k vyvázání z vlákna. Dochází k lehké ztrátě energie a tím vznikají chyby při měření.[4]

## 2.3 Typy vláken

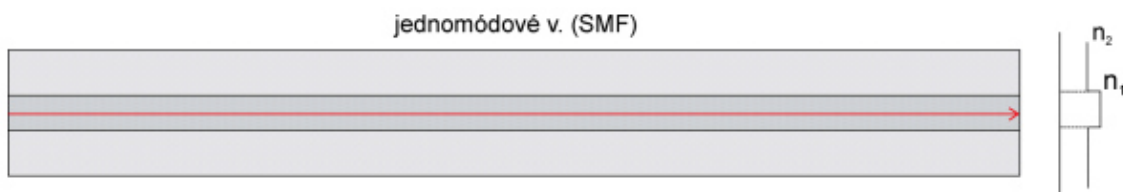
Optická vlákna rozdělujeme podle počtu vedených módů a to na jednomódová a vícemódová. Ty dále můžeme rozlišit podle profilu indexu lomu na vlákna gradientní a vlákna se skokovým profilem.

### 2.3.1 Jednomódová vlákna

Jednomódové vlákno, anglicky single mode optical fiber (SMF) je vlákno, které vykazuje ty nejlepší parametry pro přenos dat na velké vzdálenosti. Průměr jádra tohoto vlákna je nejmenší, zhruba do 10 mikrometrů. To nám zaručí, že vlákno má velký úhel odrazu a to vede k menšímu prodloužení dráhy světelného záření. SM vlákno pracuje především na vlnových délkách 1310 nebo 1550 nm a to v praxi znamená, že potřebují kvalitní zdroj laseru (světla).

Mezi vlastnosti jednomódového vlákna patří:

- Použití v páteřních sítích pro přenos signálu a pro nasazení systémů s vlnovým multiplexem DWDM
- Nejlepší parametry pro optické přenosové cesty
- Jeden jediný paprsek
- Vidová disperze se u tohoto typu optického vlákna nevyskytuje
- Nejvyšší přenosové rychlosti na velké vzdálenosti. V současnosti až 26 Tbit/s na 50 km
- Jsou vyžadovány laserové diody pro své buzení [5]



Obrázek 2.2: *Paprsek šířící se v SM vlákne, kde  $n_1$  představuje index lomu jádra a  $n_2$  představuje index lomu pláště tohoto vlákna.*

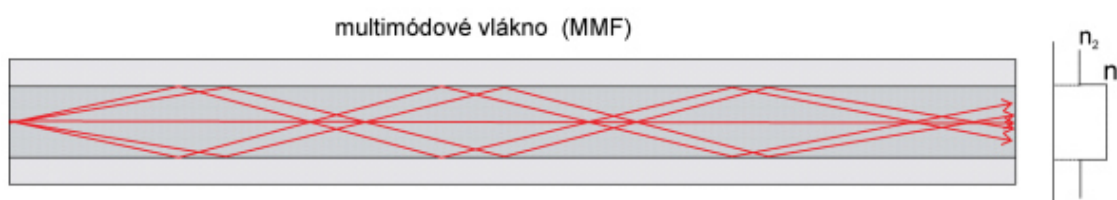
### 2.3.2 Vícemódová vlákna

Vícemódové vlákno, anglicky multi mode optical fiber (MMF) je vlákno, které se používá především na krátké vzdálenosti. Využití toho vlákna můžeme nalézt např. v počítačových sítích pro přenos dat po budovách nebo nějakém menším areálu. Rychlost přenosu u tohoto vlákna se pohybuje okolo 10 Mbit/s až 10 Gbit/s na vzdálenosti do zhruba 600 metrů. To jsou dostačující parametry pro použití např. pro většinu LAN sítí. Oproti

SM vlákna je průměr jádra u MM vlákna větší než 10 mikrometrů, bývá to zhruba okolo 50 až 62,5 mikrometrů. MM vlákno má vyšší „světelnou“ kapacitu než SM vlákno. V praxi to znamená, že pro tento typ vlákna můžeme použít levnější elektroniku jako jsou světlo vyzařující LED diody, které pracují na vlnové délce 850 nanometrů.

#### Se skokovým indexem lomu:

- SI – step index (skokový index lomu)
  - Do vlákna vstupují paprsky pod mnoha úhly a šíří se totálním odrazem, tím vytváří vícemódový způsob šíření signálu
  - Použití pro přenos na krátké vzdálenosti
  - Vzniká zde vidová disperze, která omezuje šířku přenášeného pásma

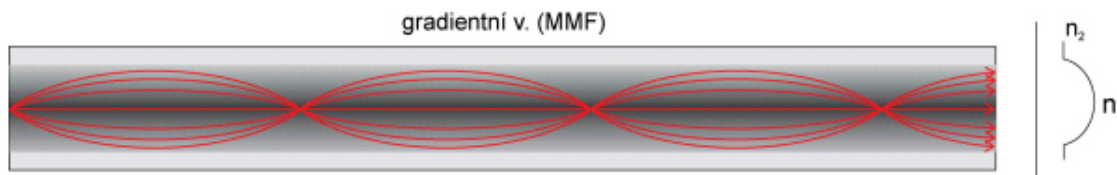


Obrázek 2.3: Paprsek šířící se v MM vlákne se skokovým indexem lomu, kde  $n_1$  představuje index lomu jádra a  $n_2$  představuje index lomu pláště tohoto vlákna.

#### Gradientní vlákno:

U tohoto typu vláken se index lomu zmenšuje se vzdáleností od středu vlákna. Paprsek opisuje sinusovou křivku a to snižuje vidovou disperzi.

- GI – gradientní index (plynulá změna indexu lomu)
  - Je tvořeno z tisíce tenkých vrstev a ty se liší indexem lomu. Čím je světelný paprsek dále od osy jádra, tím je index lomu menší, až paprsek přejde ke kolmici a nakonec se vrátí k ose jádra.
  - Dochází zde k eliminaci vidové disperze, což nám zaručuje menší zkreslení. Na konec vlákna dorazí jednotlivé módy zhruba ve stejném časovém okamžiku.
  - Jsou používána převážně v datových aplikacích [16]



Obrázek 2.4: Paprsek šířící se v gradientním MM vlákne, kde  $n_1$  představuje index lomu jádra a  $n_2$  představuje index lomu pláště tohoto vlákna.

## 2.4 Vlastnosti optického vlákna

Mezi vlastnosti optického vlákna patří např. útlum nebo disperze. Krátce si tedy rozebereme, co jednotlivé vlastnosti znamenají a představují.

### 2.4.1 Útlum

Útlum vlákna je zjednodušeně řečeno rozdíl síly signálu na jednom konci vlákna, oproti konci druhému. Platí, že čím je útlum signálu menší, tím je kvalita signálu větší a pro přenos signálu přesnější. Hodnota útlumu u skleněných vláken se pohybuje řádově v desetinách decibelu na kilometr. Vláknata vyrobena z průhledných polymerů neboli plastů mají útlum přibližně 50 až 100 decibelu na kilometr. Je tedy zřejmé, že vlákna vyrobena na bázi skla jsou pro přenos daleko přesnější a vhodnější.

Útlum optického vlákna se dá vyjádřit vztahem:

$$A(\text{dB}) = 10 * \log \left( \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \quad (2.2)$$

Kde: A ... udává útlum vlákna v decibelech [dB]

$P_{\text{out}}$  ... je výkon na konci vlákna [W]

$P_{\text{in}}$  ... je výkon na začátku vlákna [W]

### 2.4.2 Disperze

V optických vláknech dochází k více druhům disperzí. Patří mezi ně např. chromatická a módová disperze. Příčinou disperze je zkreslení signálu, který se v optickém vlákne přenáší a tím dochází ke zpoždění impulsů a změně jejich tvaru. Disperze vzniká lomem světla a různou rychlostí světla v daném prostředí.

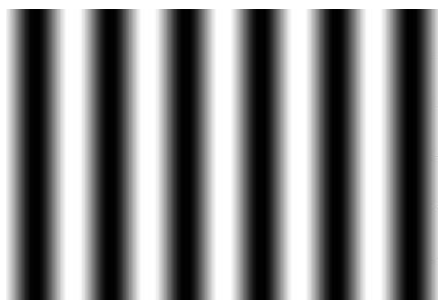
Druhy disperzí v optických vláknech:

- Módová disperze – je dána tím, že se jednotlivé módy šíří po různých optických trasách a čas, který potřebují k šíření ve vlákne je různý. Dochází k rozšíření vstupního pulzu. Tato disperze se může projevit jen u vícemódových vláken mezi jednotlivými módy.
- Chromatická disperze – za disperzi chromatickou může materiál vlákna, ze kterého je vyrobeno a také spektrální šířka použitého světelného zdroje. Jelikož je index lomu frekvenčně závislý, tak se jednotlivé frekvence ve vlákne šíří po různých optických trajektoriích, tudíž doba šíření jednotlivých kmitočtů není stejná. Eliminace této disperze je velice obtížná a zejména co se financí týče náročná. Chromatická disperze se projevuje jak u SM, tak i MM vláken.[4]

### 3 Interference

Tento pojem vídáme také často v běžném životě, jen o tom možná nevíme. Můžou to být např. olejové skvrny na mokré vozovce nebo mýdlové bubliny. Duhové zbarvení je právě jevem interference světla, která patří mezi základní jevy vlnové optiky.

Interference znamená vzájemné ovlivňování, prolínání nebo střetání jevů či hmoty. Tento jev spočívá ve skládání jednotlivých příspěvků vlnění v daném místě (elektrického a magnetického pole). Projevem interference je vznik tzv. interferenční struktury, což znamená, že u monochromatického světla se projevuje vznikem světlých a tmavých proužků, či ploch, u bílého světla duhovostí. Abychom mohli interferenci pozorovat, je důležitý výskyt koherence světla.[6]



Obrázek 3.1: *Interferenční obrazec u monochromatického světla*

Pojem interference je velice široký. Co se týče využití tohoto jevu ve fyzice a následně v technice je možné zmínit interferenci různých vlnění, jako jsou interference světla, zvuku nebo také i mechanického vlnění. Využití interference je velmi rozsáhlé, můžeme ji nalézt např. v oblastech lékařství, genetiky a v také dokonce i v psychologii. Má bakalářská práce se zabývá interferencí světelného záření.

#### 3.1 Interference světla

Podstata interference (z lat. Inter = navzájem, fero = udeřím), čili skládání vlnění byla vyložena již v části o mechanickém vlnění. Vlnění, která přicházejí do určitého bodu z různých zdrojů, popř. ze stejného zdroje, ale po různých drahách, se v tomto bodě navzájem skládají. To znamená, že u mechanického vlnění se sčítají okamžité výchylky. U elektromagnetického vlnění se sčítají okamžité hodnoty elektrické složky a magnetické složky elektromagnetických vln.

Při interferenci mechanického vlnění jsme pozorovali zesilování a zeslabování vln v místech interferenčních maxim a minim. Podle toho bychom očekávali, že projevem interference světla bude rovněž jeho zesilování a zeslabování v různých bodech prostoru. Při použití běžných, tzv. přirozených zdrojů světla (slunce, žárovka, plamen) však nic podobného nepozorujeme. Pozorovatelná interference světla totiž nastává, když je splněn základní předpoklad, kterým je koherence světelného vlnění (z lat. cohaerens = související).



Koherentní jsou světelná vlnění se stejnou frekvencí, jejichž vzájemný fázový rozdíl v uvažovaném bodě prostoru se s časem nemění.[8]

### 3.2 Podmínky pro vznik interference

Jestli se potkají dvě vlnění, dojde vždy k jejich vzájemné superpozici a interferují spolu. Aby tento jev mohl vzniknout a my ho mohli pozorovat, musí být zajištěno několik podmínek:

- Musí existovat minimálně dvě vlnění
- Všechny vlnění mají stejnou vlnovou délku
- Mezi vlněními vznikl fázový nebo dráhový rozdíl

Dráhový rozdíl vznikne např. tehdy, když do rybníka ve stejný časový okamžik dopadnou dva kameny a každý dopadne do jiného místa. Dráhový rozdíl vln je tedy vzdálenost těchto dvou bodů.

Fázový rozdíl může vzniknout stejně jako dráhový. Je tady ale ještě možnost, že na hladinu rybníka dopadnou do stejného místa dva kameny, ovšem každý v jiný časový okamžik. Mezi dopady tedy vznikne časový interval.[7]

### 3.3 Koherence světla

U interference mechanického vlnění můžeme sledovat zesilování a zeslabování vln v místech interferenčního maxima a minima. Světelné záření má podobný jev interference pozorovatelný jen tehdy, když se jedná o světelná vlnění se stejnou frekvencí, jejichž fázový rozdíl v uvažovaném bodě prostoru se s časem nemění. Jestliže máme taková dvě vlnění, můžeme je nazývat koherentními. Jestliže máme dvě vlnění, která koherentní nejsou, tak v takovém případě nelze interferenci pozorovat.

Důležitým parametrem kvality zdroje záření pro interferometrii, ale i pro jiné optické měřicí metody je koherence záření. Za koherentní zdroje lze považovat takové, jejichž frekvence záření je stále stejná a rozdíl fází vyzařovaných paprsků se nemění. Uvádí se tzv. komplexní stupeň koherence, jež zahrnuje koherenci časovou a koherenci prostorovou. Zlepšit koherenční vlastnosti můžeme tím, že zvýšíme monochromaticnost a ohraničíme velikost zářící plochy zdroje. Monochromaticnost záření ovlivňuje koherenci časovou a velikost zářící plochy ovlivňuje koherenci prostorovou.[9],[10]

#### 3.3.1 Časová koherence

Koherentní zdroj záření by měl v každém okamžiku a z celého povrchu vyzařovat monochromatické záření. Je-li generování záření s konečnou šířkou spektrální čáry, jehož vlnová délka leží v intervalu  $\lambda + \Delta\lambda$ , bude docházet při interferenci paprsků o vlnové délce  $\lambda$  s paprsky o vlnové délce  $\lambda + \Delta\lambda$  k zánějům ve směru šíření, viz obr. 4.2. Vzdálenost zánějů

můžeme označit jako koherenční délky  $L$ , která vyjadřuje schopnost zdroje generovat stacionární záření se stálou fází ve sledovaném bodě, a která je dána vztahem:

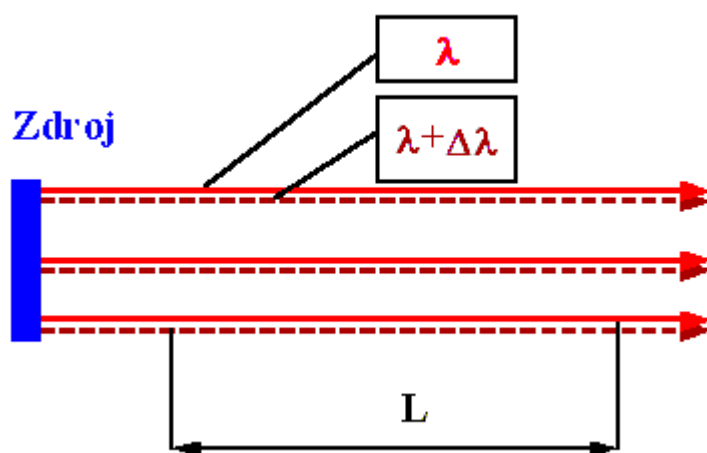
$$L = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta f} \quad (3.1)$$

Kde:  $L$  ... je koherenční délka

$\lambda$  ... vlnová délka

$\Delta f$  ... změna frekvence zdroje vyzařujícího v intervalu vlnových délek  $\lambda + \Delta\lambda$

$c$  ... rychlost šíření záření



Obrázek 3.2: Zdroj vyzařující záření o vlnové délce v intervalu  $\lambda + \Delta\lambda$

Při aplikaci zdroje záření s konečnou koherenční délkou je třeba mít na zřeteli, že kvalitní interferenci lze získat pouze superpozicí takových paprsků, jejichž optické dráhy (měřeno od zdroje záření) se příliš od sebe neliší a jejich rozdíl by měl být podstatně menší než koherenční délka  $L$ . [10]

### 3.3.2 Prostorová koherence

Prostorovou koherenci lze vyjádřit pomocí tzv. koherenční šířky. Koherenční šířka je vzdálenost  $R$  na stínítku (viz obr 4.3) mezi osou svazku a místem, ve kterém dostaneme při interferenci paprsků šířících se od kraje monochromatického plošného zdroje minimum intenzity. Koherenční šířka je především funkcí příčné velikosti zdroje  $2r$ , vlnové délky  $\lambda$  a mění se se vzdáleností stínítka od zdroje  $a$ . Platí vztah:

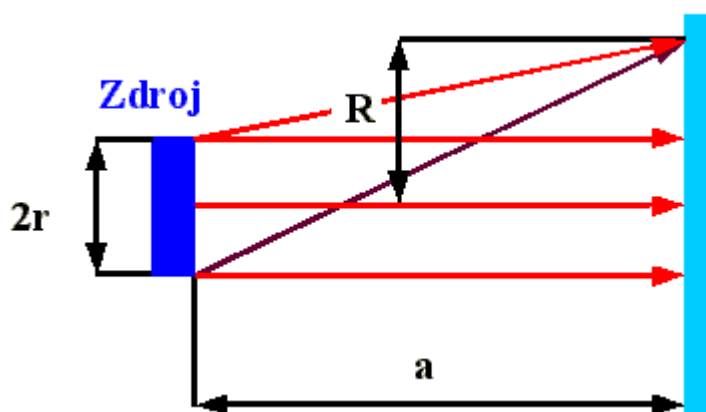
$$\frac{\lambda}{2} = \sqrt{a^2 + (R + r)^2} - \sqrt{a^2 + (R - r)^2} \quad (3.2)$$

Jelikož bývá velikost zdroje  $2r$  podstatně menší, než vzdálenost stínítka od zdroje  $a$ , lze daný vztah zjednodušit a dostaneme:

$$\frac{\lambda}{2} = \left[ a + \frac{(R+r)^2}{2a} \right] - \left[ a + \frac{(R-r)^2}{2a} \right] \quad (3.3)$$

Po úpravách lze vyjádřit koherenční šířku  $R$  ve tvaru:

$$R = a \frac{\lambda}{4r} \quad (3.4)$$



Obrázek 3.3: *Zdroj konečné velikosti*

Z uvedeného rozboru je zřejmé, že při aplikaci zdroje záření s reálnou velikostí  $2r$  lze osvětlovat ve vzdálenosti  $a$  od zdroje pouze objekty, které mají rozměr příčný k ose záření podstatně menší než  $2R$ , jinak se začne projevovat interference paprsků šířících se od okraje monochromatického zdroje, která může ovlivnit interferenci s případným dalším svazkem. Velké hodnoty koherenční šířky je možné dosáhnout především u laserů, kde velikost zdroje  $2r$  je oproti jiným zdrojům záření zanedbatelná, a proto lze lasery považovat prakticky za bodové zdroje záření.[10]

## 4 Interferometr

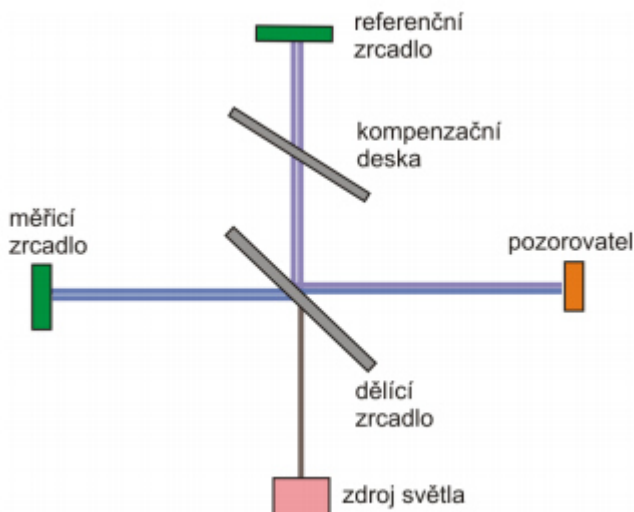
Interferometry fungují na principu interference světla, která byla popsána v kapitole 4. Tyto přístroje jsou velice citlivé a přesné. Interferometry se dnes používají k měření délek (interferenční komparátory), k studování různých povrchů, k měření tlaku a teploty plynů nebo plazmatu, k určení indexu lomu u plynů a kapalin (interferenční refraktometry), k určení struktury spektrálních čar (interferenční spektroskopy), k měření elektrického a magnetického pole, k měření rychlosti otáčení, k měření úhlového průměru hvězd a jako detekce gravitačních vln a k mnoha dalším měřením.[11]

### 4.1 Typy interferometrů

Interferometry dělíme podle toho, kolik mají interferujících vln na dvousvazkové interferometry a vícesvazkové interferometry. Mezi nejznámější dvousvazkové interferometry patří Michelsonův a mnou používaný Mach-Zehnderův interferometr. Nejznámějším vícesvazkovým interferometrem je Fabryův-Perotův interferometr.

#### 4.1.1 Michelsonův interferometr

Mezi nejznámější představitele interferometrů patří Michelsonův interferometr. Jedná se o dvousvazkový interferometr, který je zobrazen na následujícím obrázku:

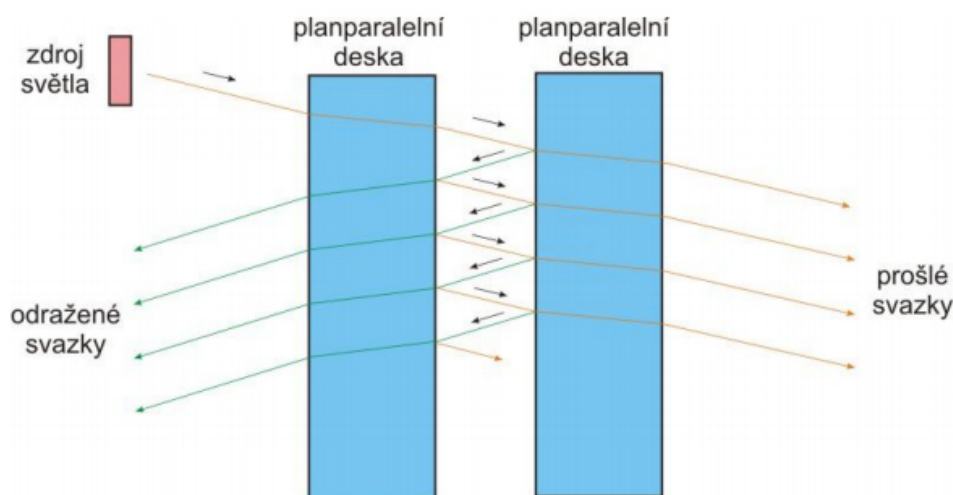


Obrázek 4.1: Schématické uspořádání Michelsonova interferometru

Světelná vlna přicházející ze světelného zdroje je rozdělena na dělícím zrcadle na vlnu referenční a měřicí (referenční a měřicí ramena interferometru). Tyto vlny jsou zrcadly odraženy zpět na dělící zrcadlo, kde dochází k jejich opětovnému spojení do jedné výsledné vlny. Na výstupu interferometru vzniká interference podle rozdílu délky obou ramen. Tento interferometr se používá především pro měření vzdáleností, pro testování rovinnosti, přímosti, pro měření hodnot indexu lomu transparentních prostředí, apod.[12]

#### 4.1.2 Fabryův-Perotův interferometr

Hlavním případem mnohosvazkového interferometru je interferometr Fabryův-Perotův (viz. obrázek 5.2). Tento interferometr je tvořen dvěma rovnoběžnými (planparalelními) deskami.



Obrázek 4.2: Schématické uspořádání Fabryova-Perotova interferometru

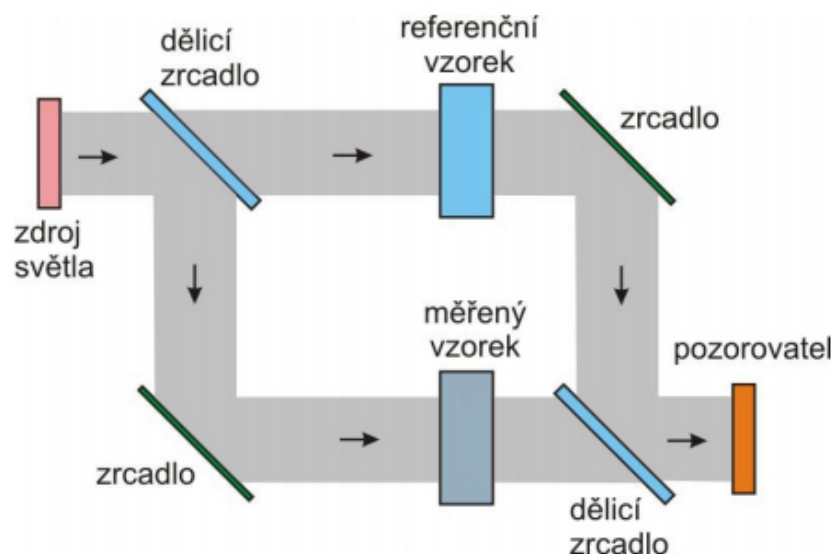
Na vstup tohoto interferometru dopadá světelná vlna, která po průchodu první deskou dopadá na desku druhou. Na druhé desce dojde k částečnému odrazu a částečnému průchodu vlny. Odražená vlna dopadá opět na první desku, kde opět dochází k částečnému odrazu i průchodu vlny. Tento proces se neustále opakuje a výsledkem je mnohonásobná interference způsobená mnohonásobným odrazem na rozhraních zmíněných dvou desek. Proto, aby na výstupu interferometru došlo ke konstruktivní interferenci všech prošlých vln je nutné, aby vzdálenost mezi deskami (délka dutiny) byla rovna celočíselnému násobku poloviny vlnové délky světelné vlny, která dopadá na vstup interferometru. Tento interferometr se používá pro měření spektrálního složení optického zařízení a díky svojí schopnosti filtrovat určité vlnové délky s vysokou selektivitou je základním stavebním prvkem většinu laserů.[12]

## 5 Mach-Zehnderův interferometr

Jedná se o jeden ze základních typů interferometrů, který se využívá v mnoha aplikacích. Tento interferometr byl vyvinut v letech 1891 až 1892, a to Ernstem Machem (narozeným 18. 2. 1838 v Brně – Chrlicích), jeho synem Ludwigem a také zcela nezávisle švýcarským kolegou Ludwigem Zehnderem. Mach-Zehnderův interferometr slouží pro přesná měření transparentních objektů, i když není tak citlivý, jako Michelsonův interferometr, u kterého prochází předmětový svazek měřeným objektem dvakrát.

### 5.1 Princip funkce

Mach-Zehnderův interferometr je tvořen dvěma zrcadly a dvěma polopropustnými zrcadly. Prvním polopropustným zrcadlem je vstupní světelná vlna rozdělena na dvě vlny a to jsou referenční a měřicí. Každá z nich jde pak vlastní trasou přes zrcadlo na druhé polopropustné zrcadlo, kde jsou obě vlny soustředěny do jedné osy šíření. Pokud jsou obě trasy stejně dlouhé, získává se na výstupu interferometru maximální amplituda interference (konstruktivní interference).



Obrázek 5.1: Schématické uspořádání Mach-Zehnderova interferometru

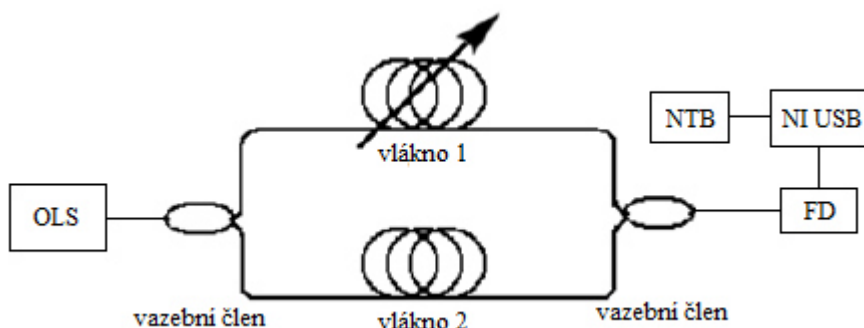
Při změně délky jedné ze dvou tras dochází k posuvu fáze jedné z interferujících vln a tudíž se mění i amplituda interference na výstupu interferometru. Tento interferometr je velmi vhodný pro zjišťování nehomogenit indexu lomu transparentních materiálů.[12],[13]

## 6 Měření pomocí Mach-Zehnderova interferometru

V teoretické části této práce jsem se pokusil popsat základní vlastnosti a principy fungování jednotlivých témat. V této části práce se posunu na část praktickou, kde budu popisovat jednotlivá měření a zapojení M-Z vláknového interferometru. M-Z interferometr byl vybrán hlavně z toho důvodu, že jeho sestavení je relativně jednoduché, ale zejména pro skutečnost, že M-Z interferometr není omezen délkou svých ramen s optickými vlákny. Jediný problém, který u toho interferometru nastává, že je omezen útlumovými vlastnostmi vláken a pasivních členů, jako jsou spojky a vazební členy. V praktických podmínkách je jeho využití nejlepší. Před fixací optických vláken na dřevěné desce o rozměrech 210x80cm, jsem musel pomocí přímé metody změřit útlumy optických vláken, abych zjistil, zda-li jsou vyhovující a jejich útlum není příliš velký.

### 6.1 Zapojení měřicí soustavy

Pro zkonstruování měřicí soustavy byl použit vláknový M-Z interferometr, který jsem z části musel vyrobit. Vyráběl jsem část s měřenými vlákny, které jsou umístěné pomocí sedmi druhů fixací na dřevěné desce. Tato deska je lépe popsána v kapitole 7. Druhé vlákno bylo volné. Na tuto sestavu jsem během měření pomocí generátoru tónů a připojeného reproduktoru generoval frekvenční tóny o zadaných hodnotách.



Obrázek 6.1: Schéma zapojení s použitím M-Z interferometru

#### 6.1.1 Jednotlivé části zapojení

Jak je již možné vidět na schématu zapojení obrázek (6.1), tak pro zapojení jsem použil optický zdroj světla (OLS), vazební členy, jednomódové optické vlákna s konektory typu FC-FC, fotodetektor (FD), měřicí kartu (NI USB) a svůj notebook, který slouží pro snímání naměřených vzorků. Nyní rozeberu, k čemu jednotlivé části zapojení slouží.



### Optical light source (OLS)

Optical light source, je optický zdroj světla. Ve své práci jsem použil OLS od firmy EXFO typ FLS-2100. Tento přístroj se dá použít pro měření jednovidových i vícevidových optických vláken. Má nastavitelný výstupní výkon o rozsahu 10dB (6dB rozsah pro LED zdroje). Zaručuje vynikající stabilitu a dá se nastavit pro jednu nebo dvě vlnové délky (podle toho, jestli použijeme SM nebo MM vlákna) v rozsahu 1310, 1550 nebo 1625nm.[14]

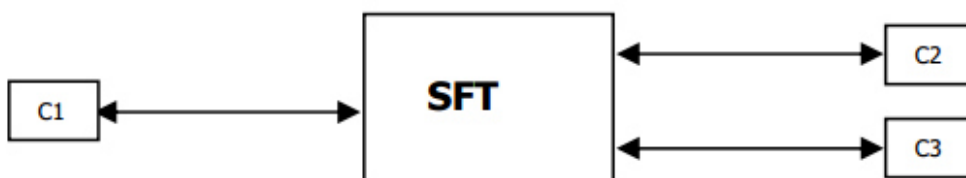
Nachází se na začátku celé měřicí soustavy a vytváří nám optický paprsek o vlnové délce 1550nm, který pokračuje dále do měřicí soustavy přes optické vlákno. Optické vlákno je přivedeno do vazebního členu, který je potřebný pro dvousvazkové zapojení M-Z interferometru.



Obrázek 6.2: Optický zdroj světla, firmy EXFO

### Vazební člen

Jako vazební člen byl použit SM coupler SFT-S35 pro vlnové délky 1310 a 1550nm. Vazební člen je u této sestavy potřebný k tomu, abych mohl rozdělit optické vlákno vedené od zdroje světla do dvou ramen. Základním principem vazebního členu je tedy rozdělení nebo zpětné sloučení světelného svazku. V mé práci byl použit vazební člen s dělicím poměrem 50:50, to znamená, že světlo o určitém výkonu šířící se ze zdroje světla je rozděleno stejným poměrem do dvou větví. Jelikož se jedná o součástku, která může fungovat stejně jak dělič, tak i jako slučovač, je tedy použita na výstupu, kde se rozdělené větve spojí opět v jednu, která pokračuje dále na fotodetektor.



Obrázek 6.3: Blokový diagram vazebního členu, kde C1, C2 a C3 představují vstupně/výstupní konektory

### Fotodetektor (FD)

Používal jsem fotodetektor od firmy ThorLabs typ PDA10CS-EC. Použitý fotodetektor má šířku pásma 17MHz a rozsah vlnových délek 700 – 1800nm. Je u něj možno nastavit zesílení.



Obrázek 6.4: Fotodetektor značky Thorlabs PDA10CS-EC

### Měřicí karta (NI-USB)

Měřicí karta od firmy National Instruments NI USB-6210 je kompatibilní s prostředím LabView, které jsem využíval pro zachytávání vzorků z měření a k tomu mi posloužila právě tato měřicí karta. Obsahuje 4 digitální vstupy a 4 digitální výstupy a 16 analogových vstupů. Maximální napěťový rozsah této měřicí karty je -10V až 10V.



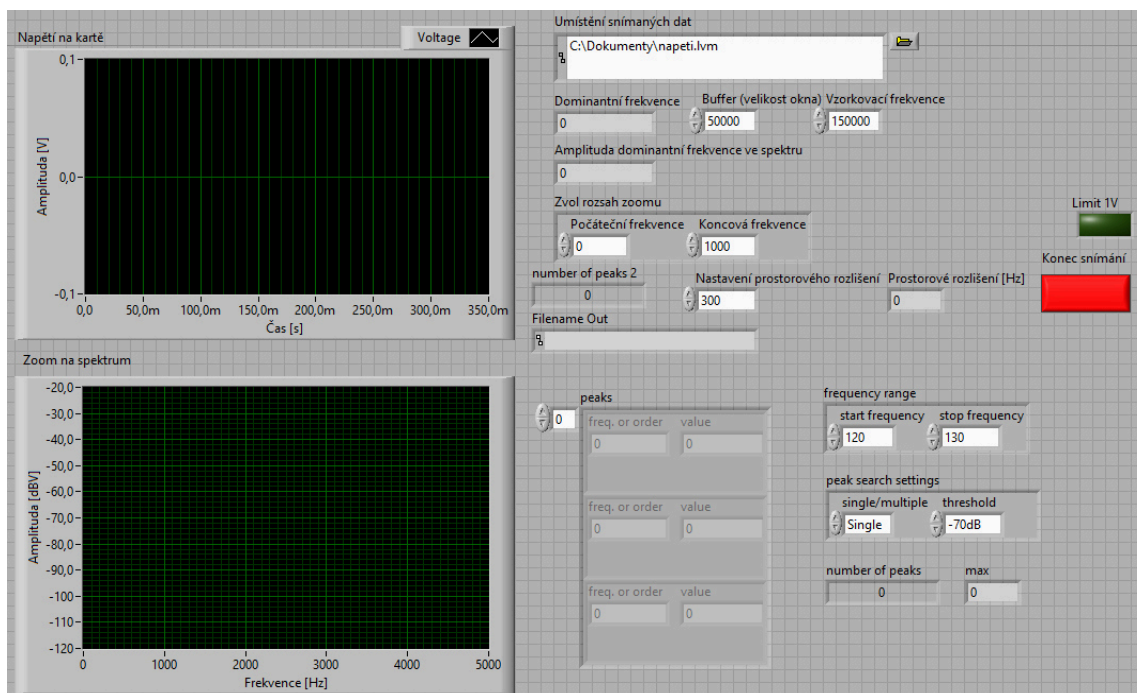
Obrázek 6.5: Měřicí karta firmy National Instruments NI USB-6210

## Generátor tónů s reproduktorem

Při měření jsem používal generátor tónů a reproduktor, kterým jsem vysílal zvolené frekvence o hodnotách 200, 500, 1000, 2000 a 4000Hz na M-Z interferometr z výšky asi jednoho metru a tím jsem snímal frekvenční odezvu daných způsobů fixací.

## 6.2 Měření dat

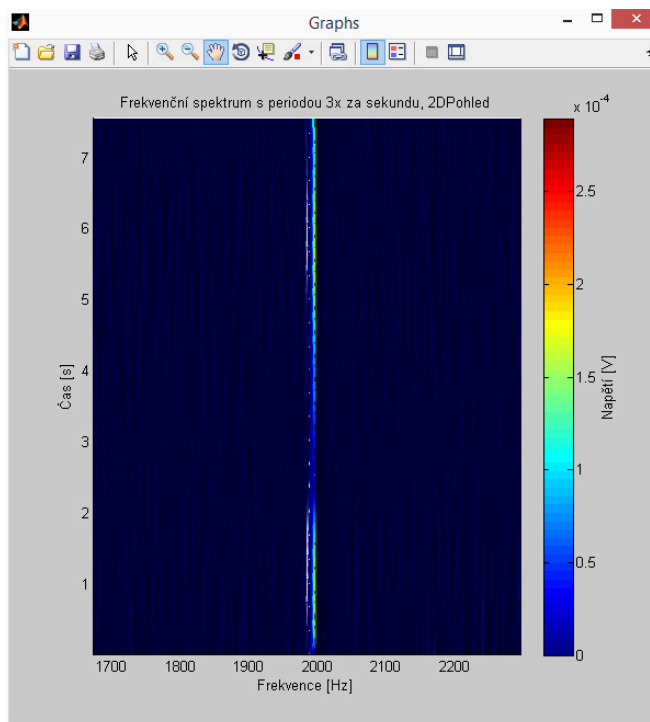
Snímání dat jsem prováděl pomocí měřicí karty v programu LabView, který je vyobrazen na obrázku (6.6). Tato naměřená data jsem si ukládal do notebooku. Pro každou fixaci optického vlákna jsem využil pěti frekvencí vysílaných pomocí reproduktoru o hodnotách 200, 500, 1000, 2000 a 4000Hz, kde jsem u každé frekvence prováděl experimentální měření 10 krát po dobu jedné minuty. Během měření se projevila extrémně vysoká citlivost M-Z interferometru, což znamenalo, že se musely eliminovat veškeré pohyby a zvuky, jinak by docházelo k nepřesnému měření.



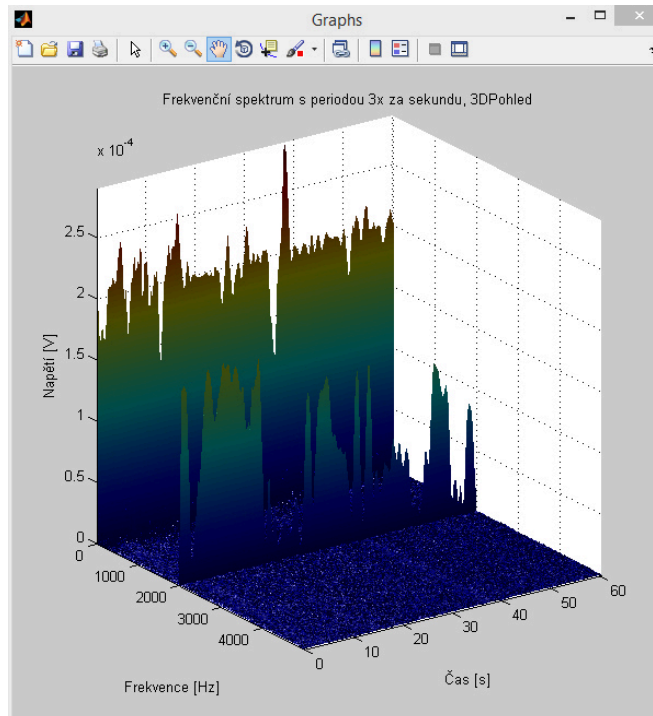
Obrázek 6.6: Program LabView pro snímání měřených vzorků

### 6.3 Znázornění naměřeného signálu M-Z interferometru

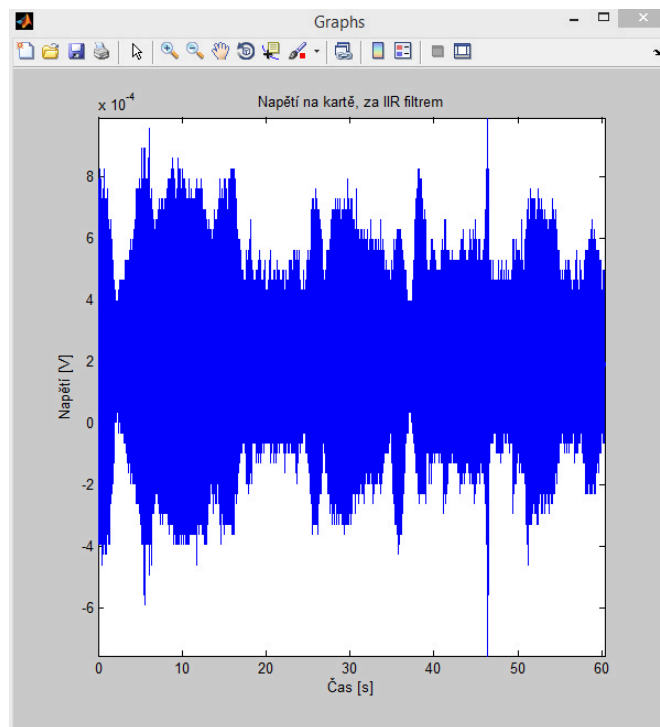
Ukážeme si, jak vypadá zpracovaný vzorek z LabView, v prostředí MatLab.



Obrázek 6.7: *Frekvenční spektrum v čase, 2D pohled*



Obrázek 6.8: *Frekvenční spektrum v čase, 3D pohled.*



Obrázek 6.9: *Napětí na kartě za IIR filtrem*

Na předešlých obrázcích je zobrazen průběh měření pro fixaci pomocí hliníkové trubky o frekvenci 2000Hz. V programu MatLab jsem nastavil rozsah zobrazené frekvence od 0 do 5000Hz, jelikož mnou měřené frekvence byli maximálně do 4000Hz, nebylo potřeba volit větší rozsah. Ve vyhodnocování byl rozestup mezi frekvencemi nastaven v programu MatLab na 2,3Hz. Bylo by vhodnější nastavení pro menší rozestupy, ale z důvodu malého výpočetního výkonu notebooku byl rozestup zvolen právě takhle.

Na obrázku (6.7) a (6.8) jsou zobrazené 2D a 3D náhledy na dané vyhodnocení. Na 2D obrázku jde pěkně vidět zachytávaná frekvence o hodnotě 2000Hz v daném čase. Na 3D obrázku jde vidět, jak se mění amplituda generovaného tónu ve frekvenčním spektru, které je rozložené v čase.

Na obrázku (6.9) je zobrazené jak se vyvíjelo napětí na kartě při měření frekvenční odezvy, kterou jsem měřil pro každý vzorek po dobu jedné minuty.

Posléze jsem v programu MatLab zvolil spektrum v čase, kde jsem našel časový okamžik, v kterém byla naměřena nejlepší amplituda daného vzorku a ten jsem uložil do programu microsoft office excel. Do excelu se mi uložily výsledky z měření a to jsou frekvence ve vybraném čase od 0 do 5000Hz s rozestupem 2,3Hz, kde každá frekvence má svoji amplitudu. S tou pak dále pracuji a vyhodnocuji naměřené výsledky.



## 7 Způsoby fixací optického vlákna

Zvolil jsem sedm způsobů fixací optického vlákna na dřevěné desce. Jak takový výrobek nakonec vypadal je zobrazeno na obrázku (7.1). Deska má rozměry 210x60cm a byla zvolena tak, aby se mi daný přípravek vlezl do auta a mohl jsem ho převézt do školy.



Obrázek 7.1: Vyrobená deska se sedmi způsoby fixací optického vlákna

Pro výrobu jsem použil dřevěnou OSB desku, což je tvrdší dřevotříska, na kterou jsem přichytil sedm optických vláken. Každé optické vlákno je přichycené jinou metodou. Metody z leva:

- Husí krk
- Hliníková trubka
- Ocelové skoby
- Sekundové lepidlo
- Oboustranná lepicí páska
- Plastová lišta
- Plastová lišta vyplněná sanitárním silikonem

Na obrázku je možné vidět barevné záslepky na koncích některých metod fixací. Jedná se o plastelínu, která byla zvolena pro odnímatelné utěsnění otvorů daných metod.

## 7.1 Husí krk

Jako první metodu jsem použil fixaci pomocí husího krku. Husí krk jsem na dřevěnou desku upevnil tak, že jsem si podél krku vyvrtal do desky dírky, kterými jsem protáhl rychloupínací pásku a s ní husí krk připevnil.

Optické vlákno, které bylo zde použito mělo útlumy na vlnové délce 1310nm – 0,5dB a na vlnové délce 1550nm – 0,13dB.



Obrázek 7.2: Detailní ukázka fixace vlákna pomocí husího krku

Tabulka 7.1: Tabulka naměřených amplitud [V] pro jednotlivé frekvence

Vzorek č.	Frekvence				
	200Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	5000Hz
1	2,14E-04	3,92E-05	6,90E-05	4,54E-06	3,57E-07
2	1,79E-04	3,68E-05	7,43E-05	4,17E-06	7,58E-07
3	9,31E-05	3,63E-05	9,05E-05	5,48E-06	4,07E-07
4	9,11E-05	3,71E-05	9,01E-05	3,88E-06	7,05E-07
5	9,04E-05	3,84E-05	8,81E-05	3,01E-06	7,38E-07
6	9,08E-05	9,86E-07	9,03E-05	2,39E-06	4,27E-07
7	9,55E-05	3,21E-05	9,10E-05	3,20E-06	1,24E-07
8	9,71E-05	3,17E-05	1,03E-04	2,81E-06	8,46E-07
9	9,77E-05	3,23E-05	1,14E-04	3,32E-06	4,00E-07
10	9,80E-05	2,26E-06	9,87E-05	3,09E-06	1,14E-06



## 7.2 Hliníková trubka

Jako druhou metodu jsem použil fixaci pomocí hliníkové trubky. Hliníkovou trubku jsem na dřevěnou desku upevnil tak, že jsem si podél trubky vyvrtal do desky dírky, kterými jsem protáhl rychloupínací pásku a s ní hliníkovou trubku připevnil.

Optické vlákno, které bylo zde použito mělo útlumy na vlnové délce 1310nm – 0,79dB a na vlnové délce 1550nm – 0,47dB.



Obrázek 7.3: Detailní ukázka fixace vlákna pomocí hliníkové trubky

Tabulka 7.2: Tabulka naměřených amplitud [V] pro jednotlivé frekvence

Vzorek č.	Frekvence				
	200Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	5000Hz
1	5,61E-05	1,83E-04	1,95E-05	7,92E-06	7,05E-07
2	5,73E-05	1,84E-04	4,62E-05	7,92E-06	3,16E-07
3	5,68E-05	1,88E-04	4,31E-05	1,26E-05	1,82E-07
4	5,93E-05	1,80E-04	3,13E-05	8,95E-06	4,84E-07
5	5,60E-05	1,86E-04	3,21E-05	7,80E-06	1,16E-07
6	5,74E-05	1,85E-04	3,37E-05	8,66E-06	1,17E-06
7	5,42E-05	1,82E-04	3,99E-05	7,20E-06	2,68E-07
8	5,89E-05	1,70E-04	3,84E-05	7,78E-06	2,61E-07
9	5,72E-05	1,73E-04	3,04E-05	9,41E-06	4,20E-07
10	6,07E-05	1,67E-04	3,98E-05	8,32E-06	5,89E-07

### 7.3 Ocelové skoby

Jako třetí metodu jsem použil fixaci pomocí ocelových skob. Přichycení optického vlákna pomocí ocelových skobiček bylo jednodušší než metody předešlé. Ovšem i tady se objevil zádrhel a to tehdy, když jsem narazil na část desky, která byla tvrdší. Ale nic, co by nespravilo kladívko a pár tvrdších ran. Samozřejmě jsem musel dávat pozor, abych nepoškodil optické vlákno

Optické vlákno, které bylo zde použito mělo útlumy na vlnové délce 1310nm – 0,25dB a na vlnové délce 1550nm – 0,17dB.



Obrázek 7.4: Detailní ukázka fixace vlákna pomocí ocelových skob

Tabulka 7.3: Tabulka naměřených amplitud [V] pro jednotlivé frekvence

Vzorek č.	Frekvence				
	200Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	5000Hz
1	1,29E-05	6,33E-05	1,75E-04	6,99E-06	1,10E-06
2	7,85E-06	6,86E-05	1,46E-04	4,39E-06	8,57E-07
3	1,06E-05	6,87E-05	1,92E-04	6,24E-06	5,93E-07
4	8,40E-06	6,94E-05	1,91E-04	5,43E-06	1,20E-07
5	1,07E-05	7,00E-05	1,34E-04	3,26E-06	7,15E-07
6	7,27E-06	6,34E-05	1,49E-04	6,24E-06	4,63E-07
7	8,35E-06	6,45E-05	1,75E-04	6,09E-06	2,79E-07
8	4,85E-06	6,95E-05	1,57E-04	5,16E-06	2,03E-07
9	1,01E-05	6,85E-05	1,65E-04	6,84E-06	3,59E-07
10	8,42E-06	6,45E-05	1,54E-04	5,08E-06	3,67E-07

## 7.4 Sekundové lepidlo

Jako čtvrtou metodu jsem použil fixaci pomocí sekundového lepidla. Přichytit optické vlákno pomocí sekundového lepidla šlo téměř bez problému teda až kromě časové náročnosti. Každý kousek vlákna, který jsem lepil k dřevěné desce jsem musel nějakou dobu držet a později zatížit, aby se vlákno přichytilo a neodlepovalo se.

Optické vlákno, které bylo zde použito mělo útlumy na vlnové délce 1310nm – 0,61dB a na vlnové délce 1550nm – 0,35dB.



Obrázek 7.5: Detailní ukázka fixace vlákna pomocí sekundového lepidla

Tabulka 7.4: Tabulka naměřených amplitud [V] pro jednotlivé frekvence

Vzorek č.	Frekvence				
	200Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	5000Hz
1	5,83E-05	4,34E-05	1,94E-04	8,27E-06	5,14E-07
2	5,75E-05	2,82E-05	2,00E-04	8,49E-06	8,18E-07
3	5,97E-05	1,83E-05	2,03E-04	9,20E-06	8,58E-07
4	4,80E-05	1,12E-05	1,87E-04	6,30E-06	7,17E-07
5	4,94E-05	2,47E-05	1,85E-04	8,44E-06	8,24E-07
6	4,50E-05	3,14E-04	1,83E-04	9,12E-06	5,10E-07
7	3,76E-05	2,67E-04	2,03E-04	5,69E-06	4,24E-07
8	4,58E-05	2,50E-04	2,03E-04	9,29E-06	3,12E-07
9	4,28E-05	2,18E-04	2,00E-04	7,44E-06	1,26E-07
10	5,08E-05	2,27E-04	1,95E-04	7,93E-06	7,07E-07

## 7.5 Oboustranná lepicí páska

Jako pátou metodu jsem použil fixaci pomocí oboustranné lepicí pásky. Zkonstruování této metody bylo jednoduché, jediné na co jsem musel dávat pozor bylo, abych lepicí pásku nalepil rovně. Je pravda, že jsem tuto metodu lepil dvakrát, protože napoprvé se mi lepicí páska překroutila a musel jsem ji přelepit znovu.

Optické vlákno, které bylo zde použito mělo útlumy na vlnové délce 1310nm – 0,30dB a na vlnové délce 1550nm – 0,16dB.



Obrázek 7.6: Detailní ukázka fixace vlákna pomocí oboustranné lepicí pásky

Tabulka 7.5: Tabulka naměřených amplitud [V] pro jednotlivé frekvence

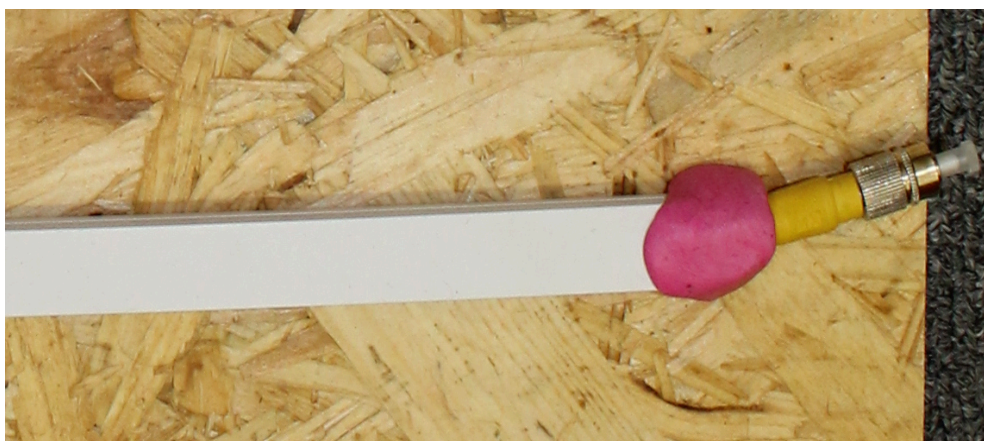
Vzorek č.	Frekvence				
	200Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	5000Hz
1	5,09E-05	1,55E-04	1,27E-04	9,81E-06	2,50E-07
2	7,52E-05	1,60E-04	1,57E-04	1,01E-05	6,13E-07
3	4,55E-05	1,97E-04	1,39E-04	6,91E-06	2,78E-07
4	6,59E-05	1,67E-04	9,25E-05	9,13E-06	2,80E-07
5	3,01E-05	1,51E-04	1,36E-04	4,32E-06	9,04E-07
6	3,45E-05	1,35E-04	9,80E-05	1,03E-05	5,21E-07
7	3,08E-05	1,27E-04	9,65E-05	6,98E-06	8,67E-07
8	1,04E-05	1,28E-04	9,24E-05	8,01E-06	7,15E-07
9	1,63E-05	1,15E-04	9,11E-05	9,32E-06	4,24E-07
10	2,98E-05	1,13E-04	7,59E-05	8,32E-06	7,92E-07



## 7.6 Plastová lišta

Jako šestou metodu jsem použil fixaci pomocí plastové lišty na kabely. Plastová lišta měla v sobě předvrtané dírkky, takže jsem pomocí těch dírek plastovou lištu přišrouboval k dřevěné desce. Do dřevěné desky jsem si musel nejdříve ostrým hrotem v místě, kde se lišta šroubovala udělat menší důlek, aby se chytl závit od šroubku.

Optické vlákno, které bylo zde použito mělo útlumy na vlnové délce 1310nm – 0,45dB a na vlnové délce 1550nm – 0,15dB.



Obrázek 7.7: Detailní ukázka fixace vlákna pomocí plastové lišty

Tabulka 7.6: Tabulka naměřených amplitud [V] pro jednotlivé frekvence

Vzorek č.	Frekvence				
	200Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	5000Hz
1	3,36E-05	1,59E-04	6,05E-05	1,08E-05	2,78E-07
2	2,65E-05	1,55E-04	6,34E-05	5,62E-06	3,87E-07
3	3,09E-05	1,66E-04	9,72E-05	5,14E-06	4,50E-07
4	2,98E-05	1,46E-04	9,87E-05	5,65E-06	6,04E-07
5	3,13E-05	1,52E-04	9,19E-05	5,88E-06	5,61E-07
6	3,77E-05	1,73E-04	9,00E-05	7,05E-06	2,02E-07
7	3,42E-05	1,63E-04	8,99E-05	6,14E-06	1,53E-06
8	3,32E-05	1,78E-04	1,16E-04	4,90E-06	1,33E-07
9	3,59E-05	1,70E-04	1,03E-04	7,10E-06	1,07E-06
10	2,69E-05	1,55E-04	9,47E-05	7,28E-06	4,38E-07

## 7.7 Plastová lišta vyplněná sanitárním silikonem

Jako poslední metodu jsem použil fixaci pomocí plastové lišty na kabely, kterou jsem po vložení vlákna vyplnil sanitárním silikonem. Tuto lištu jsem namontoval stejně jako předchozí, akorát po té, co jsem do lišty usadil optické vlákno, vyplnil jsem zbytek volného místa v liště sanitárním silikonem.

Optické vlákno, které bylo zde použito mělo útlumy na vlnové délce 1310nm – 0,76dB a na vlnové délce 1550nm – 0,41dB.



Obrázek 7.8: Detailní ukázka fixace vlákna pomocí plastové lišty vyplněné silikonem

Tabulka 7.7: Tabulka naměřených amplitud [V] pro jednotlivé frekvence

Vzorek č.	Frekvence				
	200Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	5000Hz
1	3,36E-05	6,59E-05	7,07E-05	1,14E-05	9,27E-07
2	3,07E-05	5,56E-05	7,66E-05	1,62E-05	6,57E-07
3	3,64E-05	8,12E-05	3,24E-05	7,53E-06	4,97E-07
4	3,90E-05	6,25E-05	4,02E-05	7,77E-06	5,07E-07
5	4,76E-05	1,05E-04	4,39E-05	1,13E-05	4,52E-07
6	4,61E-05	8,08E-05	6,41E-05	8,54E-06	3,35E-07
7	4,05E-05	8,09E-05	1,13E-04	8,19E-06	4,10E-07
8	4,67E-05	7,49E-05	8,92E-05	8,00E-06	3,32E-07
9	4,83E-05	7,83E-05	8,38E-05	4,22E-06	4,50E-07
10	4,77E-05	8,03E-05	4,97E-05	5,84E-06	4,85E-07

## 8 Zpracování výsledků

V předchozí kapitole jsem uvedl jednotlivé způsoby fixací a tabulky naměřených surových dat. V této kapitole se zaměřím na vyhodnocení výsledků. Vyhodnocování bude probíhat takovým způsobem, že z dat, která jsem naměřil pro jednotlivé frekvence, zvolím funkci medián. Tato funkce vybere prostřední hodnotu z naměřených výsledků. Medián převedu z jednotek V (volt, jednotka napětí) na dBV (decibel) a to pro lepší interpretaci a přehled konečných výsledků.

Jednotka dBV značí hodnotu vztaženou k 1 Voltu RMS. 0dBV je tedy 1V bez ohledu na impedanci. Tato hodnota se začala používat v souvislosti se spotřební technikou.

### 8.1 Medián

Medián slouží k tomu, abychom ze souboru hodnot dostali tu, která je právě uprostřed. Tímto zajistíme platnost, že 50% prvků je menší než medián a zároveň zbylých 50% prvků je větších než medián. U mediánu hraje roli, jaký je počet prvků, zda-li sudý nebo lichý.

Pokud je počet prvků lichý, funguje to tak, že se prvky seřadí podle velikosti od nejnižší po nejvyšší hodnotu a právě ta hodnota, která je uprostřed, je medián.

Pokud je počet prvků sudý, musím provést menší úpravu, jelikož sudý počet prvků nemá hodnotu, která se nachází uprostřed. Řešení je tedy takové, že mezi dvěma prostředními prvky uděláme aritmetický průměr.[15]

### 8.2 Výsledná tabulka

Tabulka 8.1: *Výsledná tabulka pro měření způsobů fixací optického vlákna. Udává Medián pro jednotlivá měření a danou frekvenci*

Způsob fixace	Medián [dBV] pro dané frekvence				
	200Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Husí krk	-80,33	-89,30	-80,87	-109,70	-124,90
Hliníková trubka	-84,85	-74,79	-88,86	-101,80	-128,70
Ocelové skoby	-101,50	-83,28	-75,86	-104,80	-127,60
Sekundové lepidlo	-86,25	-77,67	-74,11	-101,60	-124,30
Lepicí páska	-89,71	-76,89	-80,24	-101,20	-124,90
Plastová lišta	-89,83	-75,84	-80,60	-104,40	-127,10
Plastová lišta + silikon	-87,27	-82,02	-83,43	-101,80	-126,60

Platí, že čím menší hodnota mediánu, tím je fixace kvalitnější a pro danou metodu lepší.

### 8.3 Vyhodnocení výsledků

Vyhodnocovat výsledky budu z tabulky (8.1), která se nachází na předchozí stránce. Nyní se podíváme na to, který způsob fixace je pro daná měření nejvhodnější a která fixace má nejlepší frekvenční odezvu pro zadané frekvence.

#### Frekvence 200Hz

Pro frekvenci 200Hz jsem zjistil, že téměř všechny způsoby fixace optického vlákna jsou ucházející, až na fixaci pomocí ocelových skob, kde medián vyšel -101,50dBV. Možná to bylo způsobeno tím, že vlákno bylo špatně očištěno, což ale vylučují následná měření, kde bylo vše v pořádku. Možná za to můžou právě ony skoby, které zachytávaly tak nízkou frekvenci, namísto optického vlákna.

Naopak nejlépe se pro tuto fixaci jeví uchycení pomocí husího krku, kde vyšel medián -80,33dBV. Tím bych tuto fixaci mohl doporučit pro budoucí měření.

#### Frekvence 500Hz

Pro frekvenci 500Hz jsem zjistil, že je na tom o něco lépe než měření s frekvencí 200Hz. Každá metoda tedy vyšla v ucházejících číslech, až na fixaci pomocí husího krku, kde naopak oproti frekvenci 200Hz, kde na tom byla nejlépe, je tady naopak nejhůře. Medián u fixace husího krku vyšel -89,30dBV.

Nejlépe se pro tuto frekvenci jeví fixace pomocí hliníkové trubky, u které vyšel medián -74,79dBV. V pěkných číslech taky vyšly fixace pomocí obou plastových lišt a sekundového lepidla, takže pro budoucí měření bych mohl doporučit všechny tyto metody fixace.

#### Frekvence 1000Hz

Frekvence 1000Hz se jeví obdobně jako frekvence 500Hz. Tímto bych mohl říct, že dvousvazkový M-Z interferometr je nejvhodnější používat pro právě tyto dvě frekvence. Nejhůře se pro tuto frekvenci jeví fixace pomocí hliníkové trubky s mediánem -88,86dBV, která byla naopak u frekvence 500Hz metodou nejlepší.

Pro toto měření je nejvhodnější použít pro fixaci obyčejné sekundové lepidlo, u kterého vyšel medián -74,11dBV. Pro budoucí měření bych mohl dále doporučit ještě ocelové skoby, které vyšly také v pěkných číslech.



### **Frekvence 2000Hz**

Oproti předchozím frekvencím se tato frekvence jeví už jako méně vyhovující, kde výsledky vycházejí okolo -100dBV. Nejhorše dopadla fixace pomocí husího krku, kde medián naměřených hodnot činí -109,7dBV.

Naopak nejlépe pro tuto frekvenci vychází fixace optického vlákna pomocí oboustranné lepicí pásky. Hodnota mediánu naměřených hodnot činí -101,2dBV. Dále jsou na tom podobně fixace pomocí Plastové lišty vyplněné sanitárním silikonem, sekundového lepidla a hliníkové trubky. Tímto bych mohl tyto způsoby fixace pro měření takové frekvence doporučit.

### **Frekvence 4000Hz**

Pro tyto frekvence je dvousvazkový M-Z interferometr v zapojení, které jsem používal nevyhovující. Mediány naměřených hodnot pro všechny typy fixací přesahují -124dBV. „Nejhorše“ dopadla fixace optického vlákna pomocí hliníkové trubky, kde medián naměřených hodnot činí -128,7dBV.

„Nejvhodnější“ se pro tento typ fixace jeví sekundové lepidlo s mediánem -124,3dBV. Nedoporučil bych používat frekvenci 4000Hz, pro měření frekvenční odezvy za použití dvousvazkového M-Z interferometru.

## 9 Závěr

V této bakalářské práci jsem nejdříve rozebral problematiku optických vláknových senzorů a popsal optická vlákna. V dalších kapitolách jsem se zabýval interferencí, co vlastně interference je a jak vzniká a v poslední řadě jsem se snažil popsat interferometry. Důležitý interferometr pro tuto bakalářskou práci byl dvousvazkový Mach-Zehnderův interferometr, který byl použit pro experimentální analýzu různých typů fixací optického vlákna pro použití v interferometrických měřeních.

V praktické části bakalářské práce bylo mým úkolem proměřit optická vlákna pomocí přímé metody, abych zjistil, jestli jsou jejich útlumy vhodné pro následná měření. Útlum optických vláken, které jsem použil by neměl přesahovat útlum pro vlnové délky 1310 nm a 1550nm 1dB, což jsem splnil. Délka optických vláken byla 2,1m a konektory byly typu FC-FC. Tato vlákna jsem měl přichytit pomocí různých druhů fixací na dřevěnou desku. Tento výrobek jsem následně použil pro finální měření, kde jsem sestavil dvousvazkový M-Z interferometr a vyhodnocoval frekvenční odezvu jednotlivých fixací. Během měření jsem na měřící sestavu pomocí generátoru tónů a reproduktoru vysílal frekvence o velikostech 200, 500, 1000, 2000 a 4000Hz. Při měření jsem zjistil, že Mach-Zehnderův interferometr je extrémně citlivý na jakékoliv rušivé vlivy, co se týče otřesů nebo hlasitých zvuků. Tím jsem tedy musel zajistit, aby v místnosti ve které jsem měřil, byl naprostý klid.

Ve výsledku jsem zjistil, že sestavení dvousvazkového M-Z interferometru pro tato měření je vyhovující spíše pro nižší frekvence. Ve vyšších frekvencích (2000 a 4000Hz) byla frekvenční odezva nevyhovující. Doporučil bych tedy toto zapojení používat pro snímání nižších frekvencí zhruba do 1000Hz. Pro frekvenci o hodnotě 200Hz vyšla nejlépe fixace pomocí husího krku, pro frekvenci o hodnotě 500Hz měla nejlepší frekvenční odezvu fixace pomocí hliníkové trubky, pro frekvenci 1000Hz na tom byla nejlépe fixace pomocí sekundového lepidla, pro frekvenci 2000Hz měla „nejlepší“ frekvenční odezvu fixace pomocí oboustranné lepící pásky a nakonec pro frekvenci 4000Hz, která už nebyla příliš vyhovující pro žádnou fixaci, měla nejlepší frekvenční odezvu fixace pomocí sekundového lepidla. Když se podíváme na jednotlivé fixace a jejich výsledky, tak sekundové lepidlo má asi nejlepší frekvenční odezvu, co se univerzálnosti týče. Pro budoucí měření, pomocí tohoto sestavení bych mohl doporučit jako fixaci sekundové lepidlo.

## Použitá literatura

- [1] Ing. Martin Dušek; Ing. Michal Mazanec, Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů. [online]. 29. června 2012 [cit. 2014-03-27].  
Dostupné z URL: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_06\\_1206.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf)
- [2] Optické vlákno, Wikipedie. [online]. 20. července 2013. [cit. 2014-03-27].  
Dostupné z URL: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%A9\\_vl%C3%A1kno](http://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%A9_vl%C3%A1kno)
- [3] Vlastnosti optických vláken, ČVUT. [online]. [cit. 2014-03-27].  
Dostupné z URL: [http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP\\_08.pdf](http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_08.pdf)
- [4] Ing. Leoš Maršálek. Optická vlákna, verze 2.1.3. [online]. 2006. [cit. 2014-03-28].  
Dostupné z URL: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [5] Jednovidové optické vlákno, Wikipedie. [online]. 16. února 2014. [cit. 2014-03-28].  
Dostupné z URL: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Jednovidov%C3%A9\\_optick%C3%A9\\_vl%C3%A1kno](http://cs.wikipedia.org/wiki/Jednovidov%C3%A9_optick%C3%A9_vl%C3%A1kno)
- [6] Interference světla, ČVUT. [online]. 5. Července 1997. [cit. 2014-03-30].  
Dostupné z URL: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/optika/node7.html>
- [7] Encyklopedie fyziky. [online]. 2006 – 2014. [cit. 2014-03-30].  
Dostupné z URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/167-interference-vlneni>
- [8] Interference světla, Techmania. [online]. 2008. [cit. 2014-03-30].  
Dostupné z URL: [http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74726f6d61676e657469636be920766c6e79h&key=747](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74726f6d61676e657469636be920766c6e79h&key=747)
- [9] Coherence, Wikipedie. [online]. 16. Března 2014. [cit. 2014-04-03].  
Dostupné z URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Coherence\\_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Coherence_(physics))
- [10] Koherence záření, VUT Brno. [online]. [cit. 2014-04-03].  
Dostupné z URL: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0206.htm>
- [11] Interferometry a vlastnosti laserového záření, ČVUT. [online]. [cit. 2014-04-05].  
Dostupné z URL: [http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP\\_03.pdf](http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_03.pdf)
- [12] Ing. Ondřej Číp, Ph.D.; Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D. Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie. [online]. 14. Října 2011 [cit. 2014-04-05].  
Dostupné z URL: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_06\\_1110.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf)
- [13] Machův – Zehnderův interferometr, VUT Brno. [online]. [cit. 2014-04-06].  
Dostupné z URL: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1304.htm>
- [14] EXFO FLS-2100, data sheet. [online]. [cit. 2014-04-26].  
Dostupné z URL: [http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification\\_Sheets/EXFO\\_spec-sheet\\_IQS-FLS-2100-v5\\_en.pdf](http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification_Sheets/EXFO_spec-sheet_IQS-FLS-2100-v5_en.pdf)

[15] Medián, Wikipedie. [online]. 7. Ledna 2014 [cit. 2014-05-02].

Dostupné z URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Medi%C3%A1n>

[16] Vícevidové optické vlákno, Wikipedie. [online]. 18. Února 2014. [cit. 2014-04-26].

Dostupné z URL:

[http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADcevidov%C3%A9\\_optick%C3%A9\\_vl%C3%A1kno](http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADcevidov%C3%A9_optick%C3%A9_vl%C3%A1kno)

# Seznam příloh

[Priloha A] Naměřené hodnoty pro jednotlivé fixace optického vlákna – umístěny na CD

Součástí bakalářské práce je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

/Matlab

/Hlinikova\_trubka

/200Hz

/500Hz

/1000Hz

/2000Hz

/4000Hz

/Husi\_krk

/200Hz

/500Hz

/1000Hz

/2000Hz

/4000Hz

/Lepici\_paska

/200Hz

/500Hz

/1000Hz

/2000Hz

/4000Hz

/Ocelove\_skoby

/200Hz

/500Hz

/1000Hz

/2000Hz

/4000Hz

/Plastova\_lista

/200Hz

/500Hz

/1000Hz

/2000Hz

/4000Hz

/Plasto\_lista\_silikon

/200Hz

/500Hz

/1000Hz

/2000Hz

/4000Hz

/Sekundove\_lepidlo

/200Hz

/500Hz

/1000Hz

/2000Hz

/4000Hz